

## Les batteries

Comme évoqué précédemment dans ma présentation il nous faut définir des termes bien souvent galvaudés, voir totalement dénaturés comme le sont énergie, puissance.

D'abord quelques chiffres:

La consommation mondiale en énergie se répartit à peu près comme cela:

-> 80% combustible fossile (pétrole 31%, gaz naturel 22%, charbon 27%)

-> 20% bio masse (8% bois de chauffage et déchets organiques, 5% nucléaire, 6% hydraulique et environ 1% éolien et solaire)

L'énergie, le travail, la puissance sont des notions plus complexes qu'il n'y paraît, les plus grands physiciens eux même se sont longtemps trompés en tentant d'apporter une définition précise et rigoureuse, c'est davantage un problème linguistique associé à une méconnaissance des lois physiques qui a longtemps perduré au cours des siècles passés et a donné lieu à de multiples et intenses discussions durant des décennies entre d'éminents scientifiques.

### ENERGIE

L'origine, comme bien souvent, est l'utilisation de ce mot par Aristote qui en grec ancien signifiait "la force en action".

Seulement à l'époque d'Aristote le sens qu'il donnait à "énergie" était bien loin du sens que l'on en a de nos jours, il en avait plus une approche intuitive et surtout mécanique propre à son temps.

La notion a ensuite évoluée au gré des découvertes et des avancées scientifiques.

Il a fallu attendre les travaux de Jean de Bernouilli en 1717 pour faire évoluer cette notion.

Il déclara: "L'énergie est le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement infinitésimal subi par ce corps sous l'effet de cette force".

Pas mal, mais ici il exprime encore un travail mécanique.

Plus d'un siècle plus tard en 1843 James Prescott Joule lui fait l'expérience suivante:

En descendant, un poids met en rotation des pales qui sont freinées dans l'eau par friction.

En mesurant l'élévation de température de l'eau, Joule en déduit l'équivalence entre l'énergie potentielle du poids tombant et la chaleur produite dans l'eau.

Il déclare alors: "L'expérience a montré que chaque fois que de la force vive est apparemment détruite, un équivalent de cette force est produit, cet équivalent est la chaleur".

On notera que l'emploi de "force vive" est une notion inventée par Leibniz.

Les tâtonnements se poursuivirent et stagnèrent autour d'une définition ressemblant à ça:

En gros quelque chose qui juge la capacité à effectuer des transformations, par exemple à fournir du travail, à donner du mouvement, à modifier une température ou à changer l'état de la matière.

Celui qui trouva la clé est Max Planck, le père fondateur de la mécanique quantique.

En 1883 il énonce le 2eme principe de la thermodynamique dans un ouvrage intitulé "le principe de conservation de l'énergie".

Il explique: "au delà de ses diverses manifestations empiriques, l'énergie doit d'abord et surtout être abstrairement considérée comme une grandeur qui se conserve et que c'est même cette caractéristique qui la définit le mieux.

L'énergie est une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de celui-ci à l'instant considéré.

Elle dépend des interactions mutuelles et sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé."

L'unité officielle de l'énergie est le JOULE (J), nous verrons que le Wh est une unité plus pratique dans l'usage courant et il faut juste retenir que  $1\text{Wh}=3600\text{J}$

## PIUSSANCE

La puissance est le débit de l'énergie, le rythme auquel elle se trouve libérée, délivrée.

Deux systèmes de puissance différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais le système le plus puissant le fera plus rapidement que l'autre.

D'un point de vue mathématique la puissance est égale au produit d'une grandeur d'effort (une force, un couple, une pression, une tension, etc) par une grandeur de flux (vitesse, débit, intensité).

Elle se mesure en Watt (1 Joule/s).

Pour donner quelques références:

un corps humain au repos et en bonne santé consomme 100W en moyenne dont 30W pour le cerveau soit 2.4kWh/Jour.

Vous noterez que l'on exprime bien une puissance puisque au numérateur nous avons une énergie et au dénominateur nous avons un temps.

Cette écriture permet de mieux visualiser à l'échelle humaine et quotidienne.

1kg de TNT contient 10x moins d'énergie que 1kg de pétrole MAIS 1kg de TNT est beaucoup plus puissant.

Le pétrole brûle lentement => sa puissance est faible, le TNT libère son énergie au contact de l'air quasi instantanément par explosion, il a donc une forte puissance.

Une puissance est un débit d'énergie.

J'introduis ici ce que nous verrons par la suite, à savoir qu'une batterie peut être énergique mais pas forcément puissante et vice-versa, la confusion est souvent faite.

## ENTROPIE

Comme nous l'avons vu juste avant, le pétrole et le TNT ne réagissent pas de la même manière, ils libèrent leur énergie différemment.

L'entropie est une grandeur qui caractérise la capacité d'un système physique à subir des transformations spontanées.

Plus grande est la valeur d'entropie, plus faible est la capacité du système à se transformer.

Elle mesure aussi la quantité de l'énergie disponible au sein du système.

Au cours de ses transformations l'énergie se dégrade et devient de moins en moins utilisable.

Une énergie de bonne qualité est une énergie ordonnée, à faible entropie.

Une chute d'eau qui entraîne une turbine, possède en haut de la chute une énergie potentielle formée par des molécules d'eau ayant un ordonnancement vertical qui avec la force de gravité donne au système une faible entropie, donc beaucoup d'énergie au cours de la chute va se libérer, puis en bas de la chute les molécules d'eau se désorganisent et leur énergie a perdu sa qualité et n'est plus exploitable, on dit que l'entropie a grandi.

Plus un système évolue moins il est capable d'évoluer.

Consommer de l'énergie c'est dégrader de l'énergie donc augmenter l'entropie de cette énergie.

Pour une batterie l'énergie stockée est transférée à un consommateur, une partie sera dissipée en chaleur le reste sera exploitée par la charge sous formes diverses (mécanique, chimique, électrique, ...).

Pour tordre le cou à des usages inappropriés que l'on entend tous les jours:

-> production d'énergie, producteur d'énergie

puisque l'énergie se conserve, PERSONNE ne peut "produire" de l'énergie.

-> énergie "renouvelable"

Ce qui est renouvelable ce n'est pas l'énergie mais le mécanisme physique à partir duquel on peut consommer de l'énergie.

Une fois que cette énergie est dégradée et bien du fait du principe d'entropie elle ne sera plus renouvelable...

Comme vous le voyez il n'est pas anormal que même de nos jours la confusion persiste entre toutes ces notions puisque les relais médiatiques eux même participent à étendre cette confusion et plus efficacement encore avec le net.

Il est indispensable de bien comprendre ce que je vous ai résumé ici pour comprendre la suite, puisque une batterie est un système dont l'entropie varie à l'instar de la chute d'eau.

==== fin #5 ==== >>>>début #6 >>>>

---

Bon on va entrer dans le vif du sujet.

Il nous faut commencer par une rapide présentation des différentes technologies d'accumulateurs "lithium".

Car chacun a ses avantages et ses faiblesses, comme toutes choses en ce bas monde.

Mais avant, définissons ce qu'est une batterie lithium et par conséquence ce que ça n'est pas.

C'est un système de stockage d'énergie électrique sous forme chimique.

On dit que c'est un système électro-chimique **secondaire**, puisque la réaction chimique est **réversible**, contrairement à une **pile** qui est système électrochimique  **primaire** et **une pile ne peut être rechargée**.

Un accumulateur est caractérisé par sa capacité notée **C** et définie en **Ah (ou mAh)**, la capacité quantifie le nombre de charges électriques emmagasinés dans la batterie, et la tension qui dépend de la nature des matériaux d'électrodes utilisés.

Communément on utilise l'Ampère pour le courant de charge et de décharge, bien entendu, mais plus souvent par commodité usuelle on utilise un multiple de C.

Une décharge à **1C** définit un courant de décharge équivalent à la capacité nominale en une heure.

On parle de régime de charge ou de décharge (en anglais "charge or discharge rate")

Une association d'accumulateurs (ou de cellules, "cells" en anglais) en série et/ou en parallèle forme une batterie ("battery" en anglais ou "battery pack").

L'appellation traditionnelle pour indiquer le type d'assemblage s'exprime en nombre de S pour indiquer le nombre de cellules mises en série et en P pour le nombre d'éléments en parallèle.

Par exemple 5S2P indique immédiatement que la batterie est constituée de 5 cellules en série ayant chacune 2 éléments en parallèle.

Et non pas deux groupements de 5 éléments en série mis en parallèle, ce n'est pas équivalent d'un point de vue fonctionnel comme nous le verrons plus tard.

Il existe 2 familles principales de lithium:

-> lithium-Polymère (ou LiPo) composée d'une électrode négative en lithium métallique, d'une électrode positive poreuse dite "d'insertion" et immergée dans l'électrolyte, et une électrode polymère.

-> lithium-ion ou (Li-Ion), avec une électrode négative constituant le collecteur, fait en cuivre et ayant sur chacune de ces faces le matériau actif.

Un séparateur afin d'isoler l'électrode négative et positive.

Enfin l'électrode positive qui constitue le collecteur de courant en aluminium et recouverte du matériau actif d'insertion au lithium.

## Comparaison entre différentes technologies d'accumulateurs

Pour se faire une idée des avantages et des inconvénients il faut retenir les points suivants:

Chaque technologie a été conçue pour répondre à des besoins très variés, tant en terme de coût que d'applications.

### Le plomb

Il fête ses 150 ans et est toujours d'actualité, il est encore à ce jour l'accumulateur le plus fabriqué au monde et de loin.

Les raisons sont liées à son faible prix (environ 120 euros la tonne), au fait qu'elle est recyclable à 90% (la filière de recyclage est ancienne et indispensable compte tenu de la forte toxicité du plomb), que le parc automobile mondial est encore essentiellement équipé de batterie 12V au plomb.

Son énergie spécifique pratique (Wh/kg) est comprise entre 30 et 50, sa tension nominale est de 2.1V.

Avantages principaux:

->facilité d'utilisation et de mise en oeuvre

->pas besoin d'électronique et de gestion sophistiquée, juste prévoir un système de délestage pour éviter de la vider ou de la surcharger

->prix faible

->capable de fournir de forts courants (mais peu de temps)

->recharge possible par des moyens primitifs facilement tolérés (redressement par pont par exemple)

Cette technologie est très au point et robuste, sa fabrication est simple.

Inconvénients principaux:

->lourd et encombrant

->non stabilité de la tension de l'état chargé à l'état déchargé (pas forcément un problème majeur selon l'application)

->courant de fuite notable

->effet mémoire

->nombre de cycles moyen (500-1000)

->capacité dépendant fortement du régime de courant (effet Peukert)

->temps de recharge long (C/10 à C/5)

->profondeur de décharge faible.

## Les technologies à base de Nickel [Nickel-Cadmium (Ni-Cd), Nickel-Metal-Hydride (Ni-Mh)]

Le Ni-Cd est interdit dans l'union européenne, dans les biens de consommations domestiques, depuis 2006.

Il continue à être produit pour l'industrie car il présente de réels avantages que n'offrent pas encore les technologies lithium au même prix.

### Ni-Cd

### Avantages principaux:

- >charge endothermique (signifie absorption de la chaleur) ce qui implique qu'une élévation thermique signifie la fin de charge.
- >accepte bien les décharges complètes (ce qui augmente d'ailleurs leur durée de vie, donc préconisé)
- >grande durée de vie pouvant atteindre 20 ans (si bonne gestion)
- >électrolyte alcalin (non acide)
- >accepte de forts courants de décharge et de charge du fait d'une résistance interne faible.
- >peut être stockée déchargée
- >conserve ses performances à basse température

### Inconvénients principaux:

- >contient des matières très toxiques notamment le Cadmium (peu recyclable)
- >densité énergétique faible à moyenne (un peu mieux que le plomb)
- >auto-décharge importante (20%/mois)
- >effet mémoire important, en cas de charge discontinue la capacité perdue durable peut atteindre 30%.
- >tension nominale faible (1.2V)

## Ni-Mh

Cette technologie évolue encore de nos jours, elle reste compétitive grâce à quelques évolutions récentes. Elle se distingue du Ni-Cd par le fait de ne pas contenir de matières hautement toxiques comme le Cadmium mais contient l'hydroxyde de potassium qui est particulièrement irritant et réagit vivement au contact de l'eau, **donc la prudence est de mise** malgré tout.

Cet accumulateur se présente essentiellement sous forme "bâton" identique aux formats piles. Il est d'ailleurs pour cette raison une des principales causes de confusion entre pile et accumulateurs dans l'esprit des gens.

### Avantages principaux:

- > densité énergétique quasiment du double que le Ni-Cd
- > très faible effet mémoire sauf en fin de vie (les évolutions récentes ont bien progressé sur ce point)
- > bon recyclage
- > mêmes avantages que le Ni-Cd concernant les courants de charge et décharge (résistance interne faible)

### Inconvénient principaux:

- > ne supporte pas la surcharge (implique une surveillance plus complexe et donc un chargeur parfaitement adapté)
- > nombre de cycles plus faible que pour le Ni-Cd (sauf cas très particuliers récents), environ moitié moins.
- > auto-décharge importante vis à vis du lithium (les meilleures Ni-Mh ont 20% d'auto-décharge par an), les Ni-Mh du commerce perdent 10% de leur charge en 24h puis 10% de leur charge par mois.
- > contrairement au Ni-Cd le Ni-Mh est **exothermique**, donc chauffe quand circule un courant.
- > se stocke chargé pour compenser l'auto-décharge.
- > ne supporte pas bien les décharges profondes.

Nous reviendrons sur certains points par la suite, car il y a les généralités d'un côté et les spécificités de l'autre, qui sont nombreuses concernant les accumulateurs.

===== Fin #6 ===== >>>> debut #7 >>>>

---

Le lithium est le plus léger des métaux solides, il flotte sur l'eau.

Il développe un fort potentiel électrochimique qui en fait l'un des plus réactifs des métaux.

Cela permet ainsi de stocker une plus grande énergie à volume équivalent, on dit qu'il possède une forte énergie massique (Wh/kg).

Faible poids, tension élevée, voici un bon candidat pour réaliser un accumulateur, c'est ce que se sont dit les chercheurs de chez SONY en découvrant les propriétés électro-chimiques uniques qu'offre le lithium. Ils ont été les premiers à mettre cette technologie sur le marché au tout début des années 90.

Il faut savoir qu'une cellule lithium possède très peu de lithium en fait:

Il faut compter 8g pour une batterie de 100Wh

Soit 12.5Wh/g ou encore 80mg/Wh.

Si on prend une cellule 18650 de 3Ah nous savons que son énergie est  $W=U.I.t=3.6*3=10.8Wh$

Ce qui fait un poids de  $10.8*0.08 = 0.86g$  de lithium... avec une densité massique de  $0.53g/cm^3$  ça prend  $1.62cm^3$  seulement.

Une cellule 18650 pèse en moyenne 50g, donc l'essentiel du poids est loin d'être le lithium!

les accumulateurs lithium ioniques ne sont pas liés à un couple électrochimique précis.

C'est une différence fondamentale avec les autres technologies.

Les batteries au plomb ou au Nickel n'ont connu que très peu d'évolutions malgré leurs existences centenaires.

Pour le plomb on peut citer le calcium pour remplacer l'antimoine et pour le nickel le NiMH pour remplacer le cadmium.

Tout matériau capable d'accueillir des ions et/ou des atomes de lithium peut être à la base d'une nouvelle technologie lithium-ion.

C'est dire le champ du possible.

Les accumulateurs Li-Ion se distinguent par le matériau de leur électrodes (d'où un choix très fourni de métal-oxydes)

J'en profite pour soulever une erreur classique, ou plutôt un abus de langage très répandu concernant l'usage de "anode" et "cathode" pour un accumulateur.

Je ne parle pas ici de diodes mais des électrodes de l'accumulateur.

La méprise est que dans le cas d'une pile les électrodes n'ont qu'un seul mode de fonctionnement contrairement aux accumulateurs qui ont un fonctionnement réversible.

D'une manière générale le travail électro-chimique s'effectue entre un **réducteur**, dont le potentiel est le plus bas possible, et un **oxydant**,

dont le potentiel est le plus haut possible, afin d'obtenir une f.e.m la plus élevée possible.

Il faut aussi trouver l'électrolyte adéquat puisque celui-ci doit rester neutre (inerte) vis-à-vis des matériaux d'électrodes.

Un accumulateur électrochimique se compose donc généralement de deux électrodes, de conducteurs électroniques où siège la matière active,

et un électrolyte assurant la conduction ionique entre les deux électrodes.

Une membrane isolante, appelé séparateur, est utilisée pour séparer les électrodes mécaniquement, et ce afin d'éviter tout court-circuit interne.

En électrochimie, la dénomination des électrodes n'est aucunement rattachée à leur polarité, en conséquence

une anode (respectivement cathode) n'est pas nécessairement une électrode positive (respectivement négative).

Par définition l'**anode** est le siège d'une réaction d'**oxydation**, et la **cathode** le siège d'une réaction de **réduction**.

Pour vous en rappeler un moyen mémo-technique simple:

**A**node/**O**xydation (commence chacune par une voyelle)

**C**athode/**R**éduction (commence chacune par une consonne)

Leur nature change donc au rythme des cycles de charge et décharge.

Une charge implique que les électrons sortent du pôle + (et oui c'est l'inverse du sens conventionnel qu'on apprend à l'école, donc on a une **perte** d'électrons donc une **oxydation** => c'est une **anode**, et rentrent par le pôle -, donc **gain** d'électrons => **réduction** donc **cathode**.

Lycée de Versailles en décharge (comme dans le cas d'une **pile** qui ne peut être que générateur), le + devient la **cathode** et le - l'**anode**.

Rappelez-vous qu'il est donc important de préciser si on est en charge ou décharge quand on parle d'anode ou de cathode pour un accumulateur...

===== fin #7 ===== >>> début #11 >>>>

---

## Les différents accumulateurs lithium

Avant de voir les avantages et inconvénients principaux des accus lithium, il est nécessaire de bien appréhender que les choses ne sont pas aussi simples qu'avec les autres technologies, car seules quelques généralités peuvent s'en dégager tellement les comportements sont divers à travers cette vaste famille.

La nature des matériaux employés dans les accumulateurs Li-ion conditionne leur comportement thermique.

Selon l'objectif à atteindre, accumulateur "énergique" ou accumulateur "puissant", les choix de matériaux seront très différents.

Aujourd'hui la palette entre "énergique" et "puissant" s'est agrandie, car les besoins se sont extrêmement développés dans tous les domaines, du coup les transitions fonctionnelles sont devenues moins franches.

L'électrode négative dans les accumulateurs commercialisés actuellement est à base de carbone sous différentes formes (carbone dur, graphite, ...).

En revanche, de nombreux matériaux sont utilisés pour l'électrode positive : les premiers accumulateurs commercialisés par

Sony comportaient une électrode positive constituée d'oxyde de Cobalt (LiCoO<sub>2</sub>).

Depuis une multitude de "potions" à base d'oxydes de Cobalt, Manganèse, Nickel, Fer, Soufre, .... sont réalisées ou à l'étude à coup de budgets énormissimes, tractées par le marché automobile et le marché, en pleine expansion, des applications nomades dit "mobility".

Il existe 5 sous familles principales de Lithium possédant chacune une tension nominale propre:

-> Les lithiums à base de Cobalt (NMC, LCO, NCA) ont une tension nominale valant 3.6V~3.7V. Ces lithiums représentent la grande majorité de la production mondiale (75%), avec une nette croissance du NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) autour de 30%, le LCO (Lithium-Cobalt-Oxyde) est autour de 30% mais en perte de vitesse, le NCA (Nickel-Cobalt-Aluminium) environ 15%.

-> le LMO (Lithium-Manganese-Oxyde) donc sans Cobalt, pèse 12% du marché, tension nominale 3.6V.

-> Le LiFePO4 ou LFP (lithium-Fer-Phosphate) avec une tension nominale à 3.2V~3.3V représente 10% du marché mais est en nette progression ces dernières années.

-> Le lithium Titanate (LTO) avec une tension nominale de 2.4V est encore très faiblement fabriqué, les quantités demeurent anecdotiques comparées aux précédentes, peut-être 1%.

-> le Li-Po a une tension nominale à 3.7V et progresse lentement à 3%.

Ces pourcentages fluctuent d'année en année, ils permettent juste ici de fixer un peu les idées.

Nous reviendrons en détail sur chacune de ces familles au cours des exposés suivants.

On peut déjà retenir coté coût que:

Si on fixe le NMC à 1 comme référentiel de prix, le LFP vaut x 2, le LTO x 4.

A cela il faut évoquer les technologies en cours de développement, encore au stade de la recherche mais qui pèsent dans un futur proche. Pour en citer quelques-unes prometteuses:

Le lithium-Soufre (qui permettrait de doubler l'énergie stockée donc fortement portés par le marché automobile)

Le lithium-Air (pour son coté propre mais en attente de solutions tant les problèmes rencontrés sont complexes à résoudre)

Et l'avenir peut révéler bien des surprises, difficile donc de faire des prospectives dans ce domaine au delà de 10 ans.

En guise de récréation:

### **Le coté physique de la bête ou à quoi un accumulateur lithium ressemble**

3 types de contenants:

- > [B]cylindrique[/B]
- > [B]prismatique[/B]
- > [B]poche[/B] (pouch en anglais)

#### **Les cylindriques**



Elles sont constituées d'une enveloppe en acier fin.

Les cylindriques sont très diverses en tailles mais un standard se démarque nettement du lot les "18650" 18 est le diamètre, 650 est la longueur, on peut pas faire plus simple. :S:

On trouve également des 26650, des 32650, etc.

Donc pas question de parler de AA ou AAA comme pour les piles cylindriques.

On ne le dira jamais assez, une pile n'est pas un accumulateur.

Il existe également des "bouteilles" facilement reconnaissables par leurs formes allongées et par le fait que leurs pôles sont des trous filetés, du fait de leur grande capacité (20Ah... 100Ah par cellule), donc bien plus commode pour assembler un "bus bar".



Nous reviendrons plus loin sur ce qu'est un "bus bar".

La capacité d'une 18650 est au maximum (à ce jour) autour de 4000mAh.

Vous noterez que j'aurai pu écrire 4Ah mais pour ce type de cellule il est plus pratique de parler en mAh, car les capacités sont rarement fixées à des valeurs bien rondes, on a plus souvent affaire à 2400mAh, 3100mAh, 4200mAh, etc.

On retiendra qu'une 18650 est une cellule, un groupement de 18650 forme une "batterie" ou un "pack batterie".

## Les prismatiques



De formes parallélépipédiques, elles présentent l'avantage de la cylindrique avec un réservoir solide mais en aluminium et permet un volume d'assemblage plein sans pertes d'espaces tels que nous l'avons sur les cylindriques. La faible épaisseur sur de petites capacités permet d'équiper tout équipement à faible encombrement.

On rencontre plus largement ce type de format sur des technologies LTO (Lithium Titanate) ou LiFePO4 (lithium Fer Phosphate) de fortes capacités.

Comme pour le format "bouteille" les prismatiques sont plus pratiques à assembler sur un bus bar, c'est en majorité ce que l'on trouve dans les batteries de véhicules électriques (voitures, bus, etc).

### **"pouch" ou poche**



Ce type d'enveloppe est celui qui permet l'encombrement le plus fin, mais des trois types est aussi le moins sécurisé.

(Nous verrons que des recherches très récentes tentent avec un certains succès de contourner cette faiblesse.)

En cas de transpercement par un objet métallique de l'enveloppe l'incendie et l'explosion sont certains et quasi spontanés.

L'objet métallique crée un court-circuit interne qui libère d'abord des gaz puis après emballement thermique les gaz s'enflamme et libèrent l'énergie contenue en une fraction de seconde.

Pour cette raison on fait des tests que l'on nomme "test clou". Nous en reparlerons par la suite et de bien d'autres choses encore.

=====fin #11== >>>#17 >>>

### **Bien protéger un accumulateur lithium individuel**

Avant de parler d'assemblages de plusieurs cellules il nous faut aborder la sécurité relative à une simple cellule.

La principale source d'accident est l'emballement thermique.

Celui-ci peut se produire dans les cas principaux suivants:

- > surcharge par dépassement de la tension maximale de charge admissible (Over Voltage in Charge)
- > courant excessif en charge (ou décharge)
- > température externe excessive (exposition au soleil par exemple)
- > court-circuit

Comme nous l'avons vu précédemment selon le type de lithium il existe différentes tensions minimales / tensions nominales / tensions maximales.

Ces tensions admissibles varient légèrement d'une chimie à l'autre:

## Pour les électrodes à base de Cobalt

LiCoO<sub>2</sub> -> 3V min / 3.6V nominal / 4.2V max  
LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> -> 3V min / 3.7V nominal / 4.2V max  
NMC -> 3V min / 3.6V~3.7V nominal / 4.2V ~ 4.3V  
NCA -> 3V min / 3.6V nominal / 4.2V max

## Pour le LFP (Lithium-Fer-Phosphate)

LFP -> 2.5V / 3.2V~3.3V nominal / 3.65V max

## Pour le LTO (Lithium-Titanate)

LTO -> 1.8V / 2.4V nominal / 2.85V max

Ce sont les valeurs typiques qu'il faut retenir, en réalité sous certaines conditions et selon la technologie il est possible d'aller légèrement au-delà.

Nous y reviendrons.

**Toutes dérogations doivent avoir reçues le consentement écrit du fabricant dans le cas d'une mise en production sur le marché.**

Pour la tension minimale il faut considérer le niveau de courant (et son profil) subi en décharge. On ne limite pas à la même tension minimale un accumulateur travaillant en impulsions de courants et un accumulateur travaillant à courant constant faible. Lorsque l'accumulateur subit des  $di/dt$  forts il en résulte des  $dv/dt$  forts (puisque la résistance interne d'un accu en fin de décharge augmente), donc si on positionne le seuil de coupure par exemple à 3V la capacité restante ne sera pas à 0% mais plutôt autour de 10%~20% (selon la valeur du  $di/dt$ ), les pics de tension atteindront 3V mais n'y resteront pas.

Ce qui ne sera pas le cas si le niveau de courant de décharge est faible et constant, à 3V l'accu sera totalement vide.

C'est pour cela qu'il est indispensable de consulter la datasheet de la cellule utilisée, car chaque modèle peut avoir des spécificités propres.

La première conclusion est que pour le lithium la tension n'est absolument pas un indicateur fiable de l'état de charge.

Il faut également considérer qu'un accu lithium possède un profil de tension en "**plateau**". C'est à dire qu'entre 90% et 10% sa tension est quasi constante, c'est d'autant plus vrai pour le LFP. Il est donc plus difficile d'en déduire un état de charge (ou de décharge) en faisant une simple mesure de tension, surtout sans savoir depuis combien de temps l'accu est au repos, puisque la "**relaxation**" liée au temps de repos va faire remonter la tension.

On peut en profiter pour dire aussi que les accus lithium sont très peu dépendants à l'effet Peukert, phénomène prépondérant pour les batteries au plomb qui exprime que la capacité décroît exponentiellement selon un indice  $n$  fonction du régime de courant ( $Q=I^n*t$ ). Dans le cas des lithium la capacité nominale est quasiment intégralement restituée pour différents niveaux de courants.

Pour les techno Cobalt en général jusqu'à un régime de 1C~2C, pour les techno LFP 2C~5C. Bien entendu la durée de vie va s'en ressentir, on ne peut pas tout avoir.

Après cette petite parenthèse, revenons à nos protections indispensables.

Pour protéger notre cellule il nous faut donc lui adjoindre un circuit électronique qui interdira tout outrage qui ferait sortir de la spécification constructeur et garantira un service long et durable.

Il existe 2 types d'architectures permettant de protéger une cellule (ou un assemblage de cellules).

## **PCM (Protection Circuit Module) et BMS (Battery Management System)**

### **PCM**

Ce type de protection est dite "stand alone" car elle est autonome, elle est toujours active tant que le niveau de tension n'atteint pas un minimum.

Principaux avantages:

- > très faible prix
- > très faible consommation (typiquement quelques dizaines de  $\mu$ A en action,  $\sim 1\mu$ A en shutdown)
- > simple (sur de petits pack surtout)
- > facile à assembler

Principaux inconvénients:

- > toujours actif même durant des périodes prolongées de non service de l'accu.
- > non paramétrable après assemblage avec la cellule, valeurs de consignes figées
- > trop peu renferment l'intégralité des sécurités nécessaires
- > impossibilité de communiquer avec l'extérieur (sauf exceptions dont nous reparlerons)
- > ne permet pas à un SAV de récupérer l'historique d'usage (ceux qui travaillent en SAV comprendront)
- > Qualités très variables selon l'origine
- > Difficile de tester rapidement à 100% toutes les protections (en production).

### **BMS**

Ce type de protection renferme un  $\mu$ C (voire FPGA pour certains), elle associe donc une "intelligence" qui supervisera une chaîne de mesure tension, courant, température (AFE "Analog Front End). Un BMS assure principalement, par des moyens purement analogiques, les mesures et protections, le  $\mu$ C quant à lui supervise les paramétrages, traite les mesures retournées par la partie analogique et les formate pour la communication, les décisions non critiques, l'enregistrement d'événements, fait les calculs d'état de charge, assure la communication avec l'extérieur.

Avantage non négligeable, avec une communication on peut faire dialoguer la batterie avec son chargeur (si tant est que le chargeur soit lui même "intelligent"), ce qui permet d'optimiser le système énergie vis à vis de l'application et de pouvoir accepter uniquement un chargeur homologué (identification par codes cryptés)

Principaux avantages:

- > communications (CAN, I2C, SMBus, RS485, ...)

- > paramétrages aisés
- > permet d'avoir un même modèle de base pour plusieurs types de batteries
- > précisions des mesures
- > calcul de SOC, SOH
- > data-logging pour SAV, historisations
- > tracabilité, identification
- > tests simplifiés en production
- > flexibilité
- > sécurité maximum

Principaux inconvénients:

- > prix de série plus élevé que pour un PCM
- > complexité
- > nécessite de développer du soft
- > coût de développement supérieur (outils pour paramétrages/communication, niveau de compétence en SAV supérieur)

=====fin #17 ===== >>> #18 >>>

## Architecture d'un système de protection type PCM

**Les principaux acteurs du marché PCM:** Mitsumi, Ricoh, Seiko, Texas Instruments, Lapis,...

Tous systèmes de protections, y compris les BMS, se composent (normalement) des fonctions suivantes:

- > mesure de tension(s) cellule(s)
- > mesure du courant de charge et de décharge
- > mesure d'au moins une température
- > commutateurs électroniques de charge et de décharge (NMOS ou PMOS)
- > équilibrage (si au moins 2 cellules en série)
- > fusible

## Mesure de tension(s) cellule(s)

En général les mesures de tensions réalisées par ces marques sont plutôt précises (entre +/-20mV et +/-5mV), elles se font à très grande impédance d'entrée bien entendu.

Un circuit dédié PCM possède un indice associé à sa référence afin d'identifier facilement les tensions pour lesquelles il stoppera la charge et la décharge, puisque ces valeurs ne sont pas paramétrables je le rappelle.

Il est nécessaire d'ajouter un filtre RC pour filtrer les dv/dt qui se manifestent en charge et décharge. Un soin tout particulier est à mettre en oeuvre lors du routage, vu les très faibles courants pas question de mettre l'entrée de mesure loin de la cellule... il faut donc veiller à router des liaisons les plus courtes possibles.

Il n'est pas rare de voir de la résine déposée entre les pattes du circuit de mesure jusqu'aux fils d'entrées sur la carte afin que l'humidité ne puisse pas influencer la mesure.

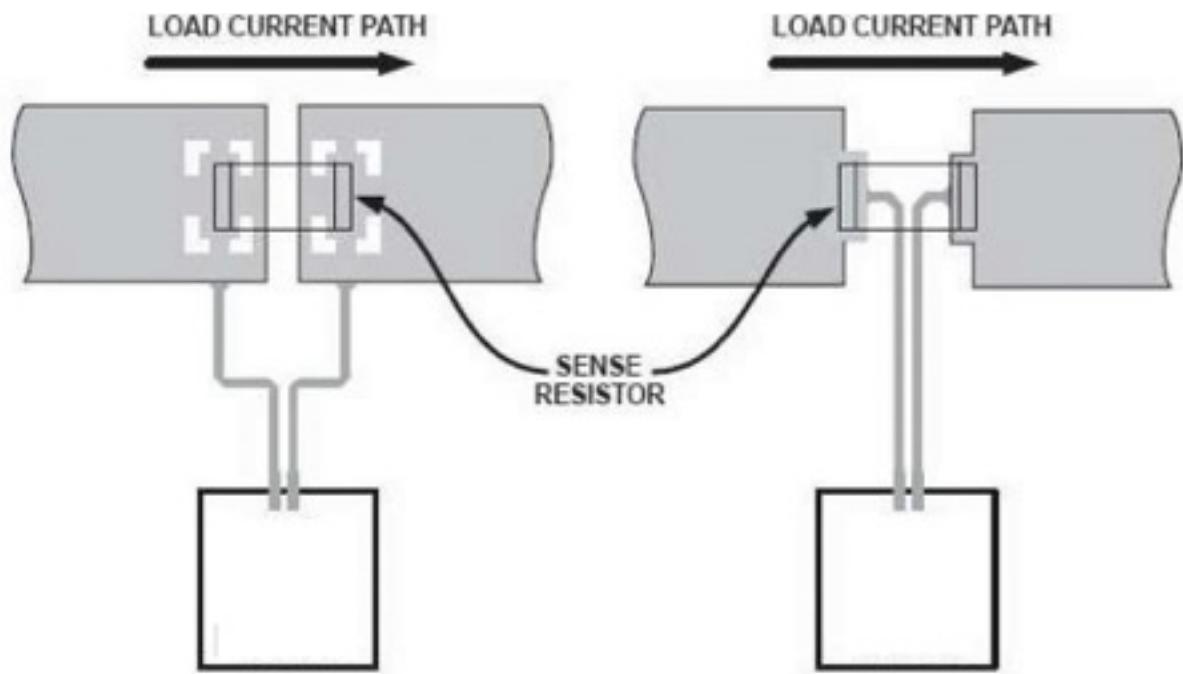
## Mesure de courant

Sur un PCM le courant est mesuré de 2 manières:

-> mesure par shunt dont la valeur dépend du courant max (1mOhm ~ 100mOhm en général)-> mesure à travers la résistance passante du MOS de décharge

La mesure par shunt est à privilégiée, car plus stable et précise.

La mesure par le  $R_{ds(on)}$  du MOS dépend de la référence du MOS et de la température, c'est donc économique mais peu fiable donc à proscrire pour faire de la sécurité, en tout cas c'est mon point de vue. Là encore il faudra soigner le routage, en faisant une liaison type Kelvin en s'assurant que les pistes soient routées bien parallèles et parfaitement symétriques, cheminant côté à côté avec un filtre également.



**Figure 1. Kelvin Connection**

A gauche ce qu'il ne faut pas faire, à droite la bonne démarche.

Sur les PCM la mesure de courant se fait généralement du coté - (low side), les interrupteurs électriques étant dans ce cas des NMOS, moins chers que les PMOS et ayant des  $R_{ds(on)}$  plus faibles. Le shunt se calcule en fonction du courant max continu et de la sensibilité de l'étage de mesure.

Par exemple si nous avons 10A max continu, on évite d'aller au delà de 100mV de chute de tension pour ne pas trop perdre en énergie dissipée dans le shunt.

Ce qui donnerait  $R=0.1/10=10\text{mOhm}$  et  $P(R)=R \cdot I^2=0.01 \cdot 100=1\text{W}$ .

En principe la plage mesurable offerte par les circuits PCM se situe entre  $\pm 50\text{mV}$  et  $\pm 300\text{mV}$ .

## Mesure de température

Cette mesure est essentielle.

Un accumulateur lithium doit être limité dans son fonctionnement aux températures suivantes:

En **charge**: de **0 à 45°C**

En **décharge**: de **-20°C à +60°C**

**On ne déroge pas à ces limites sous aucun prétexte**

On ne charge pas un lithium en température négative, **jamais**.

Si vous deviez le faire, il faudra dans ce cas utiliser un réchauffeur.

Ce n'est pas vraiment un problème puisque c'est le chargeur qui fournira l'énergie nécessaire à ce réchauffeur et non pas l'accu.

Vous noterez qu'il existe un cas critique, celui où vous avez déchargé à un régime soutenu et que votre cellule est montée par exemple à 50°C.

Dans cette situation vous ne pourrez pas recharger aussitôt, il faudra attendre que la température retombe en dessous d'un seuil de 43°C au moins.

C'est pour cela qu'une étude thermique préalable doit être conduite AVANT afin de sélectionner le bon candidat, c'est à dire la bonne cellule.

Plus une cellule est "énergique" plus elle sera exotherme à fort courant en règle générale, vous commencez à voir la limitation de vouloir absolument la plus grande capacité...

Nous y reviendrons là encore.

La mesure de température se fait économiquement et précisément avec une CTN, en général une valeur de 10K est commune.

Elle doit être fixée sur le corps de la cellule, en général on trempe la CTN dans la pâte thermique (la même pâte blanche que pour les transistors lorsqu'on les monte sur un dissipateur) et on solidarise le tout avec un scotch en kapton qu'on enroule autour de la cellule, le fil parallèle à la cellule, la CTN au centre du cylindre.

Si vous mettez 2 cellules en parallèle arrangez-vous pour coller la CTN entre les 2 cellules sur la tangente des 2 cylindres.

Sur les PCM vous ne trouverez généralement qu'une CTN, qui mesure la température cellule.

Au minimum il en faudrait 1 de plus pour mesurer la température des MOS.

Sur de petits packs, genre 1 à 5 cellules, le PCM se doit d'être le moins cher possible, c'est malheureusement une erreur que de sacrifier la sécurité au coût... c'est à dire quelques dizaines de cts. Pire, la grande majorité des PCM "low cost" ne détectent que la température haute en décharge, la plupart ne protègent pas de la température négative en charge, sous prétexte que l'équipement a très peu de chance d'être rechargé dehors en hiver... ni de la température haute en charge puisqu'ils considèrent que c'est au chargeur d'assurer cette protection, c'est dire comment votre protection est assurée avec ces daubés pas chers!

Donc prudence quand vous ferez vos courses sur le net ;)

==== fin #18 ##### >>> #21 >>>

## Les commutateurs électroniques

Là encore 2 possibilités:

la topologie "1 chemin" ou la topologie "2 chemins".

Késako?

Un accu se charge et se décharge, comme il faut bien aller du + cellules au + de sortie, donc les commutateurs se doivent d'être **bidirectionnels**, puisqu'en série, mais considérons 2 cas:

-> on décide de faire un pack pour un courant de décharge de 60A et un courant de charge max de 5A.

Le nombre de MOS, si on décide de faire un montage "1 chemin" devra être identique pour le commutateur de charge ET de décharge, par exemple 4+4, soit 8 MOS.

L'avantage du mode "1 chemin" est que je n'aurai que 2 pôles en sortie (le + et le -) identique pour charger comme pour décharger.

Maintenant si j'opte pour le mode "2 chemins", je n'aurai plus que 5 MOS, 4 pour assurer la décharge et 1 pour assurer la charge, par contre j'aurai 3 bornes en sortie, le + et - de décharge et le + de charge. Dans ce cas les MOS travaillent de manière **unidirectionnelle**, le MOS de charge ne "voit" pas la décharge et les MOS de décharge ne "voient" pas la charge.

Si vous faites une seule batterie autant opter pour le mode "1 chemin", si vous en faites 100000 vous économiserez 300000 MOS ça cause tout de suite ce genre d'économie.

Donc ne soyez plus surpris si vous voyez des batteries à 3 fils (hors CTN de charge).

Les commutateurs dans les PCM sont encore à grande majorité des NMOS mis dans le chemin du retour du - batterie.

Ce choix est encore une question d'économie, puisque au delà de 4S il faudrait un driver pour piloter correctement la grille des NMOS s'ils étaient mis en "high side" donc sur le côté du +.

On peut par contre mettre des PMOS dans le + mais leur prix étant plus élevés vous n'en trouverez pas dans des PCM, money is money.

Certains PCM sont vendus moins de 1\$ (par 5k) faut pas s'attendre à des prouesses technologiques.

Nous reviendrons sur ce sujet intéressant quand nous parlerons des BMS.

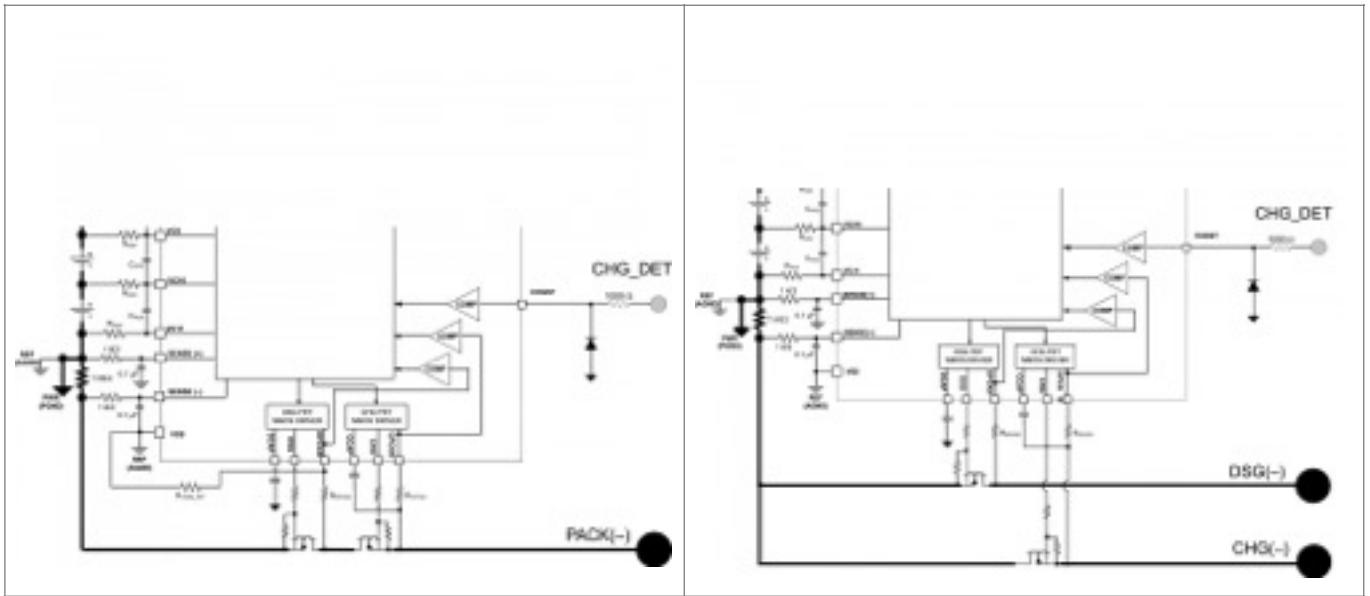
## Fusible

Eh oui, en toute logique il devrait y avoir un fusible sur toute batterie, car le mode de défaut d'un MOS est 50% circuit ouvert MAIS aussi 50% en circuit fermé... et qui va protéger dans ce cas là en cas de court-circuit? Le câble ?

Non! le fusible parce que vous y avez pensé.

Cela pourrait être aussi une protection thermique style disjoncteur thermique non réarmable, donc "one shot" mais c'est plus cher.

Nous verrons la prochaine fois que dimensionner un fusible n'est si trivial que ça, je pense que beaucoup seront surpris par l'état de l'art en la matière, vous ne verrez plus vos fusibles de la même manière.



## Fusibles et protections

Dans ce chapitre nous allons faire le tour des protections que l'on peut utiliser pour une batterie.

### Fusibles

Ce dispositif est le plus ancien moyen de protection contre les surcourants et autres court-circuits. Traditionnellement simple, autonome, peu cher, il offre un avantage qui le rend incontournable: la faculté d'isoler physiquement la source de la charge après mise en protection.

Sous réserve de bien respecter la tension d'isolement (nous y reviendrons car cela est souvent négligé). Nous verrons aussi que les fusibles peuvent être plus complexe qu'il n'y paraît à première vue et coûter très cher dans certains types d'applications.

Le dimensionnement d'un fusible est bien plus compliqué qu'il n'y paraît, dans certains cas complexes un logiciel est même requis.

Ce qui est moins connu ou pris en compte dans les designs ce sont les influences des phénomènes liés à l'environnement immédiat dans lequel évolue un fusible.

Par exemple le champ électromagnétique dans un bus bar, qui induit des effets thermo-mécaniques qui vont générer des stress et nuire à la durée de vie, la température ambiante et intrinsèque pour lesquelles un derating (déclassement) sera à considérer, le profil des courants circulants (continus ou pulsés) devra être bien modélisé selon les conditions au sein de l'application. Tous ces phénomènes doivent être bien considérés pour assurer un dimensionnement fiable et une protection pérenne.

Un fusible a 2 fonctions: **Protéger et Veiller**

-> Protéger en cas de dépassement de la consigne de courant définie pour l'application en ouvrant le circuit.

-> Veiller, c'est à dire être le moins intrusif possible pour le reste du circuit qu'il protège, lorsque le courant circule normalement ou en dessous d'une valeur limite pré définie.

Nous savons que l'énergie dissipée sous forme de chaleur par une résistance s'écrit  $W_j=R \cdot I^2 t$   
La grandeur caractéristique de coupure d'un fusible est définie traditionnellement par la grandeur  $I^2 t$  qui, pour l'élément résistif qu'est le fusible, correspond à une énergie par unité de résistance.

Vous voyez que si  $R$  vaut 1 Ohm nous retrouvons bien  $W=I^2 t$ , c'est cette caractéristique qui est utilisée dans les docs de fusible.

Si  $W_j > W_a$  ( $W_a$  énergie admissible) le fusible fait son travail, il ouvre le circuit.

Cela traduit le fait que si le carré d'un certain courant circule durant un temps suffisant  $t$ , l'énergie fournie sera suffisante

pour échauffer le conducteur présent dans le fusible et provoquer son ouverture par fonte du matériau.

En réalité il y a 2 phases dans ce principe.

A/ Si l'énergie atteint une valeur dite de "pré-arc", la fusion est initiée de manière irréversible.

B/ Après avoir atteint le "pré-arc" on entre dans la phase d'ouverture du fusible proprement dite, ou phase d'arc, phase d'extinction du courant.

Donc pour le dimensionnement nous devons prendre en compte  $I^2 t = I^2 t(\text{pré-arc}) + I^2 t(\text{arc})$

Nous voyons qu'il nous faut connaître avec précision l'allure du courant (on parle de profil) par exemple lors de la mise sous tension (inrush current).

Notamment dans le cas de la charge d'une grande capacité électrochimique vide à l'état initial, l'appel de courant peut être très élevé et faire fondre le fusible si rien n'est prévu.

Le nombre de marche/arrêt, les écarts de températures, le profil de courant, l'influence de l'environnement, accentuent le phénomène de "fatigue thermique", qui peut se définir comme étant l'ensemble des contraintes au fil du temps vécu par le fusible.

De manière imagée pour s'en faire une bonne idée, un trombone en acier plié  $x$  fois finira par rompre.

Enfin pour calculer ce fusible il nous faut connaître avec exactitude l'ensemble des caractéristiques du chemin de courant (résistance de ligne: valeur du shunt de mesure de courant, estimation de la piste de puissance du cuivre sur le PCB, l'inductance de ligne, les résistances  $R_{ds(on)}$  des MOS).

Car pour un accu lithium sa résistance interne étant très faible, le courant en cas de court-circuit peut être très grand et ses valeurs habituellement négligeables ne le sont plus.

Si on les néglige le  $I^2 t$  sera faux, et le fusible fera son travail trop tôt ou bien trop tard.

Nous verrons que le temps de réaction d'ouverture des MOS en cas de défaut en courant est essentiel et doit être court pour que le fusible ne s'ouvre pas trop tôt et surtout que le SOA des MOS ne soit pas atteint (SOA: Safe Operating Area), caractéristique souvent très négligée, voire ignorée par beaucoup.

Tout cela participe à l'efficacité d'un dispositif accumulateur, et vous verrez que tout cela est rarement présent dans les batteries bon marché.

===== fin #32 =====

=====début #45=====

On va parler cette fois des problématiques de **mise en série et en parallèle des accus lithium**.

Que ce soit en série ou parallèle, il est important de monter un pack avec des éléments neufs provenant d'un même lot de fabrication (bien vérifier le code du lot).

Cela garanti un SOC nominal équivalent pour chaque cellule, une tension équivalente (aujourd'hui certaines marques sont à quelques mV d'écart seulement).

Il y a encore peu la norme voulait qu'une batterie neuve soit chargée à 50% en vue du transport, qui comme je le rappelle est un niveau de charge qui permet un courant de fuite minimum à température < 20°C.

La législation a évoluée depuis peu (avril 2016) et oblige à 30% max pour le transport désormais.

Voir par exemple ici:

[https://www.ups.com/content/us/en/about/news/service\\_updates/20160111\\_lithiumbattery\\_US.html](https://www.ups.com/content/us/en/about/news/service_updates/20160111_lithiumbattery_US.html)

L'assemblage le plus critique est sans conteste le mode série unitaire (2S, 3S, ... 20S, etc) alors qu'on pourrait penser à priori le contraire.

La raison est simple, si un élément est défectueux la chaîne est rompu, la capacité du groupement sera réduite à l'élément le plus faible.

Autre problème en série, le déséquilibre.

Du fait des protections hautes et basses, si au moins un des éléments est à la traîne en charge il y aura un autre élément qui atteindra le seuil haut en premier, la charge sera alors stoppée et la capacité globale sera plus faible.

De même si un élément est faible, en décharge il atteindra le premier le seuil bas et la sécurité stoppera toute décharge alors qu'il reste potentiellement de l'énergie dans les autres cellules.

Dans les 2 cas la batterie ne stockera plus sa charge nominale, c'est le début de la fin.

Pour y remédier il faut donc impérativement équilibrer le pack, c'est à dire dériver du courant de la batterie la plus chargée pour le donner à la moins chargée, de manière générale il faut redistribuer au moins riche.

Il existe 2 types d'équilibrage:

-> équilibrage passif, c'est une résistance qui va dériver le courant

-> équilibrage actif, c'est un système de type DC/DC qui va être mis en oeuvre.

Chacun de ces 2 systèmes a ses avantages et ses inconvénients:

#### ->**PASSIF**

avantage: simple, peu cher

inconvénient: dissipe de l'énergie en chaleur => oblige à des courants d'I/[I]équilibrage faible => temps d'équilibrage long. (équilibrage = [I]balancing dans la littérature technique/[I]), équilibrage en décharge déconseillé.

#### ->**ACTIF**

avantages: permet des courants forts => [I]balancing/[I] rapide, rendement très élevé => quasiment pas de perte, permet un équilibrage en charge et décharge

inconvénient: cher, complexe

L'usage de l'un ou l'autre dépend donc du type de batterie, de sa capacité, du budget, des contraintes de l'application, du niveau technique du concepteur, du nombre de cycles visé.

Comme je le disais au début, la différence entre des cellules de même lot est très faible (attention pas chez tous les fabricants) et si le nombre de cycles visé n'est pas supérieur à 500 l'équilibrage sera très peu sollicité.

A condition également que le montage mécanique et électrique conserve un bon équilibre.

On comprend bien que si une des cellules est plus sollicitée que les autres par une électronique foireuse ça n'ira pas.

Donc hors de question de tirer une alim sur la cellule du bas par exemple ou toute autre individuellement, ça ne fonctionne jamais.

Toutes consommations sur un groupement série **doit se faire sur l'intégralité du pack.**

En assemblage parallèle la cellule la plus faible sera soutenue par sa ou ses copines en parallèle, donc plus un pack contient d'éléments en parallèle plus le pack sera fiable.

Même si une perte de capacité est à considérer, l'application continuera de fonctionner.

Il est facile de voir que si, dans un groupement de 5 cellules en parallèle, une a 10% de charge en moins la capacité des 5 sera affaibli de seulement 2%.

Un autre inconvénient du mode série unitaire ou série avec des groupements parallèles (3S5P par exemple) survient quand on doit faire des chaînes comme par exemple 24S ou plus encore.

Les circuits classiques sont faits pour mesurer au maximum 16S, il est donc nécessaire de réaliser ce qu'on appelle un **stacking** ou du **daisy chain**.

Sur le papier c'est assez simple dans le principe, ça consiste à empiler les circuits en reliant la masse du circuit supérieur au + du circuit inférieur et ainsi de suite.

Seulement il y a au moins 2 inconvénients:

1/ il faut respecter l'ordre de branchement des mesures en partant toujours du potentiel le plus bas et aller vers le plus haut.

2/ au delà d'une certaine tension des précautions sont à prendre, car par exemple 24S c'est 88V et on est **en continu**.

On peut ajouter un autre inconvénient qui est de pouvoir alimenter l'électronique en toute sécurité.

La première mise sous tension de ce genre de groupement ne se fait pas sans une certaine fébrilité, imaginez lorsque vous appuyez sur ON avec un groupement de 200 cellules.

Il a donc fallut imaginer des solutions plus confortables dont nous reparlerons.

J'en profite pour bien mettre en garde qu'à ce stade une recommandation incontournable est de vérifier au moins plusieurs fois son câblage et tout ce qui peut être vérifié [B]DOIT[/B] l'être.

Une autre précaution que connaisse ceux qui ont suivi une habilitation électrique est de toujours utiliser des EPI (Equipement de Protection Individuel) qui a minima doivent être des lunettes spéciales pour protéger des éclats ou projections et des outils isolés.

Ici vous trouverez des infos:

[http://www officiel-prevention com/formation/port-des-epi/detail\\_dossier\\_CHSCT php?  
rub=89&ssrub=179&dossid=227](http://www officiel-prevention com/formation/port-des-epi/detail_dossier_CHSCT php?rub=89&ssrub=179&dossid=227)

Bien se rappeler qu'en électricité il n'y a pas que le risque en tension mais dans le domaine des batteries le risque du court-circuit est tout aussi dangereux (aveuglement, projections de matières en fusion, gaz, substances toxiques).

Pour en revenir à l'équilibrage, la qualité et la durée de vie de votre batterie en est directement impactée il faut donc à tout prix l'éviter.

Par exemple un des facteurs déclenchant est l'écart de température entre les différentes cellules. Si dans un groupement par exemple de 10 cellules, une est soumise à une différence de 5°C elle va dans le temps vieillir différemment. La notion de gradient thermique est donc à considérer.

C'est le cas si par exemple vous montez la batterie dans un ensemble et que sans faire attention vous avez un point chaud près du pack cellules (moteur, dissipateur, etc).

Pareil si vous collez votre circuit de protection sur le pack, il faudra éviter que par exemple les MOS chauffent une cellule.

La stabilité thermique est donc le point clé à ne pas négliger sous aucun prétexte.

===== fin #45 =====